

doi: 10.11720/wtyht.2023.1578

游越新, 邓居智, 陈辉, 等. 综合物探方法在云南澜沧老厂多金属矿区深部找矿中的应用[J]. 物探与化探, 2023, 47(3): 638–647. <http://doi.org/10.11720/wtyht.2023.1578>You Y X, Deng J Z, Chen H, et al. Application of integrated geophysical methods in deep ore prospecting of Laochang polymetallic mining area in Lancang, Yunnan[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2023, 47(3): 638–647. <http://doi.org/10.11720/wtyht.2023.1578>

# 综合物探方法在云南澜沧老厂多金属 矿区深部找矿中的应用

游越新<sup>1,2</sup>, 邓居智<sup>1,2</sup>, 陈辉<sup>1,2</sup>, 余辉<sup>1,2</sup>, 高科宁<sup>1,2</sup>

(1. 东华理工大学 核资源与环境国家重点实验室, 江西 南昌 330013; 2. 东华理工大学 地球物理与测控技术学院, 江西 南昌 330013)

**摘要:** 云南澜沧老厂是三江特提斯成矿带南段最重要的多金属矿区之一, 经多年开采后浅部资源已近枯竭。近年来矿区深部新发现了花岗斑岩和斑岩型多金属矿化, 凸显深部多金属的找矿潜力。为查明研究区深部控矿地层和构造的赋存情况, 助力深部找矿突破, 本文采用大功率激电法和音频大地电磁法对矿区深部结构进行探测。对采集的激电和电磁数据进行处理和反演后, 获得了研究区的激电异常分布和深部电性结构特征, 结合区域地质资料, 得出以下主要结论: 测区西北部的低阻、高极化异常为地表铁锰矿、银锰矿和深部多金属矿化的共同反映, 测区中东部的高阻高极化异常与深部多金属矿化有关。中上石炭统灰岩及白云岩地层西厚东薄, 其中西侧地层向 SW 方向倾伏, 东侧地层上覆于下石炭统依柳组; 隐伏花岗斑岩向 NE 方向倾伏, 其深部 2 300~2 800 m 水平范围段与深断裂的耦合部位为深部多金属矿化有利区。将大功率激电法和音频大地电磁法相结合可提升深部多金属矿探测的可靠性, 指导后续钻孔布设。

**关键词:** 老厂多金属矿区; 大功率激电; 音频大地电磁; 综合物探; 深部找矿**中图分类号:** P631**文献标识码:** A**文章编号:** 1000-8918(2023)03-0638-10

## 0 引言

三江成矿带位于特提斯—喜马拉雅成矿域中部, 经历了晚古生代—中生代特提斯构造演化和新生代碰撞造山运动, 发生了多幕式大规模的成矿作用<sup>[1-2]</sup>。云南澜沧老厂作为该成矿带南段重要的铅、锌、银、铜多金属矿区<sup>[3-4]</sup>, 具有多期成矿与多种成矿物质来源等特点<sup>[5]</sup>。但澜沧老厂作为老矿区, 经历了逾 600 年的开采, 矿区浅部探明的保有资源日益减少。为保障矿区的可持续发展, 已开展了多年接替资源的勘探工作, 近年来有钻孔在研究区深部新发现了花岗斑岩和斑岩型多金属矿化, 指示该地区具有较大的深部找矿潜力<sup>[6-7]</sup>。因此, 急需查

明该区域的深部结构, 助力深部多金属矿找矿工作。

目前, 综合物探方法在深部金属矿勘探中得到了广泛应用, 且通常采用激发极化法和电磁法相结合的综合物探方法来开展实际工作<sup>[8]</sup>, 张光之等<sup>[9]</sup>通过激电中梯扫面和可控源音频大地电磁法相结合的物探方法圈定了深部隐伏矿体且深部验证效果良好; 毕炳坤等<sup>[10]</sup>通过高精度磁测、激电中梯扫面结合激电测深的物探方法寻找隐伏矿床并取得找矿突破。大功率激电法在圈定铜、铅、锌、钼等金属矿的激电异常中具有明显效果<sup>[11-12]</sup>, 音频大地电磁法(audio-magnetotellurics, AMT)因其效率高、勘探深度大、受地形及高阻屏蔽作用影响小等优点在寻找深部隐伏矿中广泛应用<sup>[13-17]</sup>。由此可见, 大功率激电法和 AMT 均能够快速有效地探测深部隐伏多金属

**收稿日期:** 2022-11-22; **修回日期:** 2023-02-18**基金项目:** 国家自然科学基金项目(42130811、41864004); 江西省主要学科学术带头人培养计划项目(20204BCJL23058); 核资源与环境国家重点实验室开放基金(2022NRE18、2020NRE26); 自然资源部深地科学与探测技术实验室开放课题(Sinoprobe Lab 202214)**第一作者:** 游越新(1998-), 男, 硕士研究生在读, 研究方向为勘探地球物理。Email: 2020110093@ecut.edu.cn**通讯作者:** 邓居智(1972-), 男, 教授, 主要从事资源地球物理勘探和电磁法正反演研究工作。Email: jzhdeng@ecut.edu.cn

矿体的位置,且具有覆盖范围广的特点。

为此,在以往区域地质工作的基础上,在云南澜沧老厂矿区开展大功率激电法和 AMT 相结合的综合物探工作,通过大功率激电法圈定区域激电异常范围,利用 AMT 获取地下的电性结构,重点讨论控矿地层和断裂的地下空间展布特征,为后续的深部

地质找矿工作提供地球物理依据。

## 1 地质与地球物理特征

### 1.1 地质背景

云南澜沧老厂矿区内(图 1)自下而上出露的地

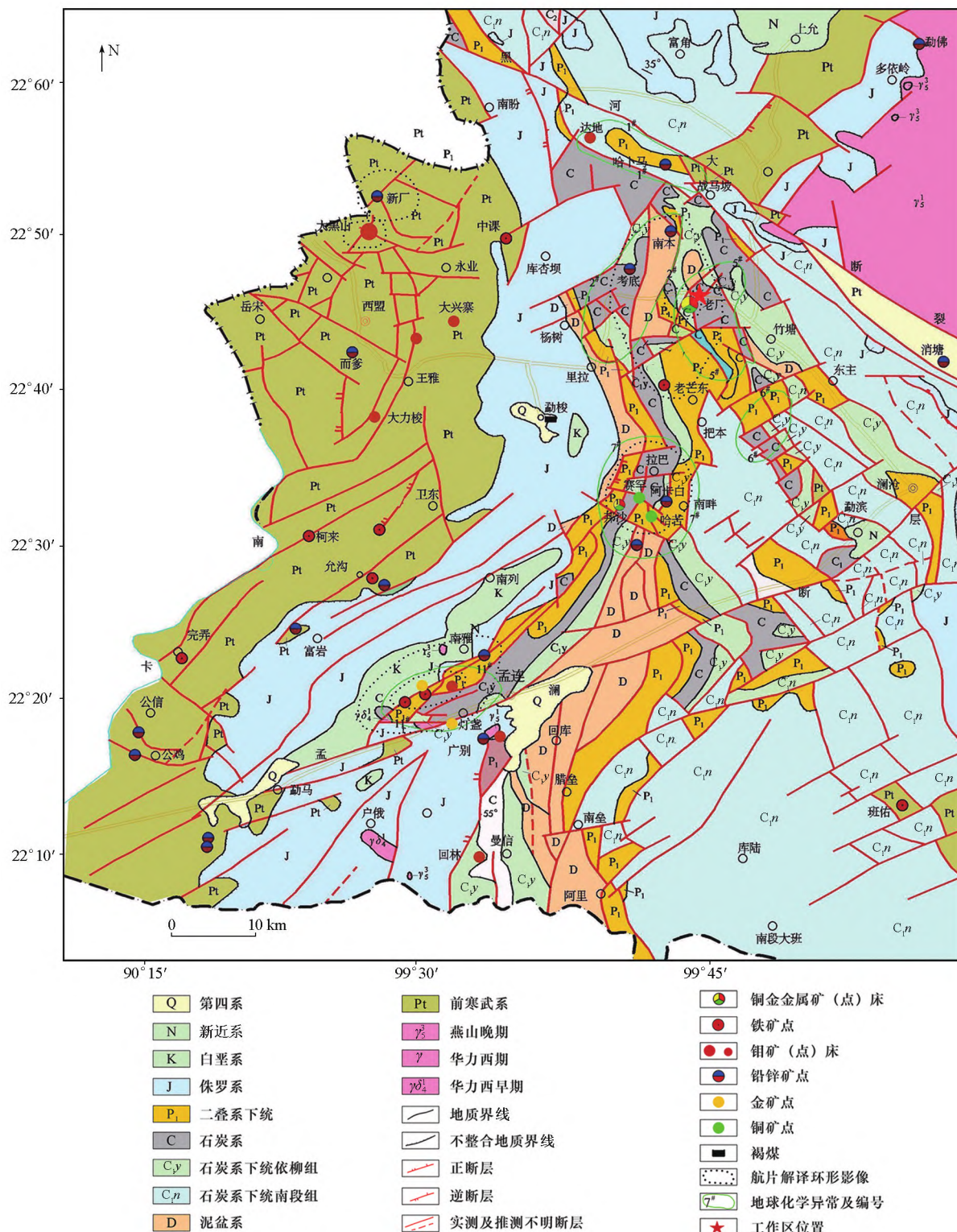


图 1 云南省澜沧地区区域地质简图(修自文献[3])

Fig.1 Regional geological sketch of Lancang Area, Yunnan Province (modified from reference [3])



层分别为泥盆系、石炭系、二叠系和第四系<sup>[3,5,18-19]</sup>。其中泥盆系在矿区内可分为下泥盆统( $D_1$ )和中上泥盆统( $D_{2-3}$ )2层,区内下泥盆统( $D_1$ )厚度大于330 m,其下部为页岩、石英砂岩和砂质泥岩夹细粒长石石英砂岩,上部为页岩和砂岩夹硅质岩;区内中上泥盆统( $D_{2-3}$ )厚约70 m,主要为千枚状板岩、长石石英砂岩、杂砂岩和硅质岩夹蚀变凝灰岩。在矿区内石炭系分为下石炭统依柳组( $C_{1y}$ )火山岩和中上石炭统( $C_{2+3}$ )碳酸盐岩2层。矿区内依柳组( $C_{1y}$ )总厚540~870 m,可细分为7层,自下而上依次为 $C_1^1$ 、 $C_1^2\beta$ 、 $C_1^3\alpha$ 、 $C_1^4$ 、 $C_1^{5+6}$ 、 $C_1^7\beta$ 、 $C_1^8$ 地层,为火山杂岩建造。矿区内仅出露二叠系下统,可分为上、下两层, $P_1$ 地层厚度为210~280 m,主要为白云质灰岩和块状石灰岩,局部可见同质角砾状灰岩; $P_2$ 地层厚度为50~140 m,主要为块状泥晶灰岩,顶部可见厚层状灰岩。第四系厚度为0~90 m,主要由残坡积、砂土、黏土、砾石、崩落灰岩等组成。区内部分地层具有控矿特征,从老到新有 $C_1^{5+6}$ 、 $C_1^7\beta$ 、 $C_1^8$ 、 $C_{2+3}^{1+2}$ 、 $P_1$ 这5个含矿层位,以 $C_1^{5+6}$ 、 $C_1^8$ 与 $C_{2+3}^{1+2}$ 接触带为主, $C_{2+3}^{1+2}$ 是最有利的含矿岩性。

区内构造主要包括褶皱、断裂和节理裂隙等,其中断裂发育和褶曲不完整为其主要特点<sup>[3,5,18-19]</sup>。区内褶皱自西向东主要包括象山单斜、雄狮山向斜、老厂背斜、睡狮山向斜和冬瓜林新寨背斜等。区内主要断裂为SN向和NW向2组大规模断裂,其交汇部位控制着老厂火山一次火山岩(花岗斑岩)的喷发与侵位,对区内矿化有明显的控制作用;次要断裂为规模较小的NE向断裂,对区内矿化影响不明显。区内裂隙和节理较发育,以陡直裂隙为主,主要包括SN向、NNE向、NE向、NW向、NNW向和EW向等组及层间裂隙。

区内岩浆岩主要为下石炭统依柳组( $C_{1y}$ ),岩石类型主要包括熔岩、火山碎屑熔岩、火山碎屑岩和火山碎屑沉积岩等,可分为3个旋回<sup>[3,5,18-19]</sup>(见表1)。第Ⅰ旋回主要为钙碱性玄武质岩浆分异产物,上部岩性主要为安山岩和集块岩,中部主要为玄武岩及熔结角砾岩,下部为安山质凝灰岩及熔结角砾岩;第Ⅱ旋回主要为粗玄武质岩浆分异产物,岩性主要为凝灰角砾岩、凝灰岩和沉凝灰岩;第Ⅲ旋回为碱性橄榄玄武岩及碱性分异产物,上部岩性主要为玄武岩和熔结凝灰岩,下部主要为火山角砾凝灰岩、凝灰岩和沉凝灰岩。另外,矿区内出露有小规模的侵入岩脉,主要岩性包括辉石云煌岩、同化混染石英钠长岩、碱性花岗斑岩和辉绿岩等。

表1 老厂矿区火山岩岩性及旋回划分

Table 1 Lithology and cycle division of volcanic rocks in Laochangmining area

分层代号	主要岩性	含矿性	旋回划分
$C_1^8$	凝灰岩、沉凝灰岩 火山角砾凝灰岩	含矿	Ⅲ
$C_1^7\beta$	玄武岩 熔结凝灰岩	含矿	
$C_1^{5+6}$ $C_1^4$	凝灰岩、沉凝灰岩 凝灰角砾岩	主矿层	Ⅱ
$C_1^3\alpha$	集块岩 安山岩		
$C_1^2\beta$	玄武岩 熔结角砾岩		Ⅰ
$C_1^1$	熔结角砾岩 安山质凝灰岩		

## 1.2 岩(矿)石电性参数特征

岩(矿)石电性参数特征是资料解释环节中重要的参考依据,为此,在研究区以往获取的物性资料基础上,对区内主要地质单元的岩(矿)石电性参数进行了较为系统的整理与归纳,统计结果如表2所示。

研究区岩(矿)石电性参数特征分析结果表明,二叠系( $P_1$ )、中上石炭统( $C_{2+3}$ )地层中的碳酸盐岩和泥盆系(D)地层中的硅质岩具有高电阻率、低极化率特征。下石炭统依柳组( $C_{1y}$ )火山岩中的安山质或玄武质凝灰岩(不含矿)、安山质或玄武质砾岩(不含矿)和泥盆系(D)地层中石英砂岩及泥质砂岩具有中电阻率、低极化率特征。区内铅锌矿石、黄铁矿石、黄铜矿石和下石炭统依柳组( $C_{1y}$ )含矿火山岩具有低电阻率、高极化率特征。由此可见,矿(化)体与围岩之间存在明显的电性差异,为电磁法找矿提供了良好的电性前提。

## 2 综合地球物理勘探数据的采集、处理和分析

本文中大功率激电和AMT数据来自于“云南省澜沧县老厂地区多金属矿床地球物理勘探”项目,测点分布如图2所示。其中20条激电中梯扫面测线以近NEE方向分布于矿权范围段中部,网度为100 m×20 m,每条测线长约2 km,共计1 704个测点。另外在激电异常区中心处选择3个测点(图2中CS1、CS2与CS3)开展激电测深工作。本次大功率激电采集设备为重庆地质仪器厂研制的DJF-25 kW大功率激电测量系统,包含发射(DJF5-1A 5km大功率发射机)和接收(DJS-8接收机)2部分,该系统采用短导线工作方式进行数据采集。通过野外实验确定工作参数:AB供电电极距为1.5 km,MN接收电极距为20 m,供电电压为1 000 V,供电周期为12 s,断

表 2 老厂矿区岩(矿)石电性参数统计  
Table 2 Electrical parameters of rock (ore) in Laochang mining area

地层	标本数	岩(矿)石名称	电阻率 $\rho/(\Omega \cdot \text{m})$		极化率 $\eta/\%$	
			变化范围	几何均值	变化范围	几何均值
$C_{2+3}^{1+2}, C_1^8, C_1^7$	10	铅锌矿(含黄铁矿)	2~34	5.5	10.25~58.81	24.10
$C_{2+3}$	3	铁锰矿石(有裂隙含褐铁矿较多)	3~16	7.3	1.27~2.94	11.30
	4	锰矿石	480~776	604	8.9~13.2	1.83
$P_1^2$	5	泥晶灰岩	191~401	248	0.21~0.39	0.26
$P_1^1$	6	白云质灰岩	1048~4265	1827	0.48~1.52	0.81
$C_{2+3}^3$	6	珊瑚灰岩	1171~3790	1908	0.43~0.76	0.53
$C_{2+3}^{1+2}$	9	白云质灰岩	1064~2947	1893	0.19~0.59	0.35
$C_1^8$	10	沉凝灰岩	119~841	327	0.49~2.94	1.81
$C_1^7$	2	玄武岩	1492~1985	1765	1.34~6.0	3.10
	3	玄武质凝灰岩	392~990	678	0.28~1.46	0.66
	5	玄武质凝灰岩(含铅锌矿、黄铁矿)	82~110	95	5.46~10.67	7.63
$C_1^{5+6}$	13	粗面安山质凝灰岩(富含黄铁矿、黄铜矿)	6~205	65	7.01~38.39	16.10
	4	粗面玄武质硅化凝灰岩	796~1675	1083	1.45~2.16	2.14
$C_1^4$	12	安山质凝灰角砾岩(含黄铁矿)	25~196	56	6.38~23.88	13.10
$C_1^3\alpha$	4	安山质集块岩、凝灰角砾岩(含黄铁矿)	49~84	70	7.31~18.51	10.65
$C_1^2\beta$	15	玄武岩、玄武质熔结角砾岩	281~2911	642	0.4~8.01	2.33
$D_1$	7	石英砂岩	480~2247	944	0.74~2.04	1.22
$C_1^2 \sim C_1^8$ (按火山岩 是否含矿 分别统计)	31	含矿火山岩(玄武质凝灰岩、粗面安山 质凝灰岩、安山质凝灰角砾岩)	6~205	63.7	5.46~38.39	13.40
	36	火山岩(凝灰岩、玄武岩、 集块岩、熔结角砾岩)	203~2911	647	0.28~8.01	1.82

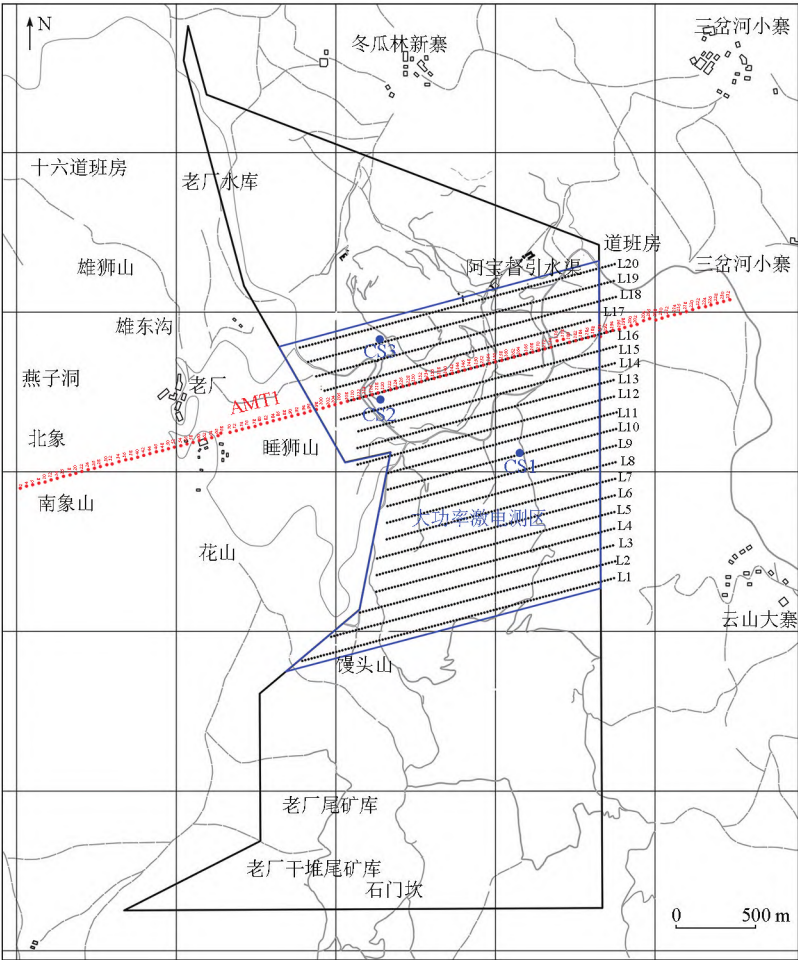


图 2 研究区大功率激电与 AMT 测点分布  
Fig.2 Distribution map of high-power induced polarization sounding and AMT survey stations in the study area

电延时为 50 ms,采用宽度为 20 ms,叠加次数为 2 次。激电测深工作的最小  $AB$  供电极距为 3 m,最大  $AB$  供电极距为 1.5 km。对采集的原始数据进行整理编辑后,利用专业软件绘制相关图件。

AMT 的 1 剖面起始于老厂矿区,以近 NEE 向穿过矿权范围段,止于矿权范围段东侧附近,长度约 4.6 km,测点间距 40 m,总计 116 个测点。此次 AMT 数据通过加拿大凤凰公司生产的 MTU-5A 大地电磁仪进行采集,采用“十字”交叉布极和电磁列阵方式同步采集电场水平分量  $E_x$ 、 $E_y$  和磁场水平分量  $H_x$ 、 $H_y$ ,野外采集时间不小于 30 min。首先利用傅里叶变换将采集的原始时间域信号转换成频率域信号,然后通过互参考技术和 Robust 估计<sup>[20]</sup>对受随机噪声干扰的测点进行处理以提升数据质量,同时辅以功率谱挑选剔除干扰严重的的数据,获得了 10 000~0.35 Hz 频率范围内较高质量的视电阻率和阻抗相位数据。对获得的 AMT 数据进行了维性分析和构造走向分析,维性分析结果表明研究区地下结构以二维特征为主,因此,研究区 AMT 数据适用于二维反演,并根据构造走向分析结果对 AMT 数据进行了主轴旋转,以满足二维结构的理论假设。在此基础上,考虑不同极化模式对反演结果的影响,通过非线性共轭梯度算法对 AMT 数据进行了二维

反演试算,最终实施 TE+TM 模式反演获取二维电阻率剖面结果。

### 3 综合地球物理异常特征分析与综合解释

#### 3.1 大功率激电异常分布特征

基于云南澜沧老厂矿区采集的激电中梯扫面和激电测深数据,绘制了研究区激电中梯扫面视极化率分布(图 3)、研究区激电中梯扫面视电阻率分布(图 4)和研究区激电测深实测数据反演结果(图 5),图 5a~5c 分别表示 CS1、CS2、CS3 激电测深点的实测数据,图 5d~5f 分别表示 CS1、CS2、CS3 激电测深点的反演结果。

图 3 中可见有 2 个明显的高视极化率异常区域,在图上分别用 M1 和 M2 标示。M1 异常区位于测区西北部,视极化率极大值为 9.63,区内异常分布不连续。结合图 4 可知该异常区表现为中、低阻特征,同时异常区内 2 个激电测深点的反演结果(图 5e、5f)显示,区内浅部为低阻、高极化特征,深部为高阻、低极化特征。结合区域地质资料可知该异常区为断裂交汇处,因此,初步推断该区异常可能与地表的铁锰矿及银锰矿有关,但不排除深部有多金属矿脉的可能。M2 异常位于测区中东部,视极化

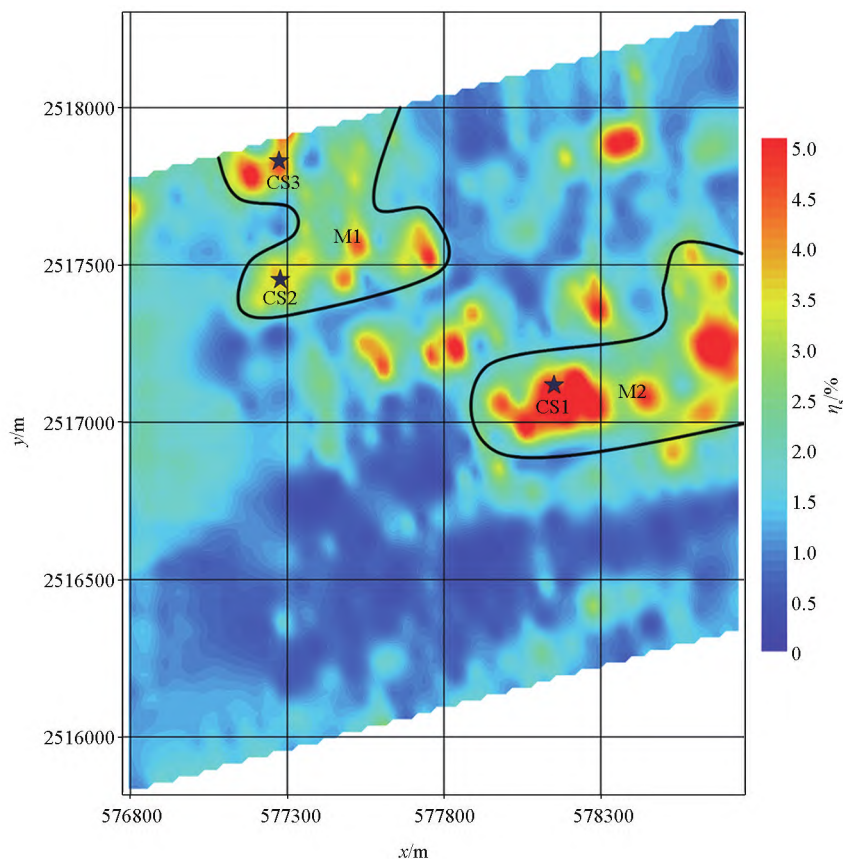


图 3 研究区激电中梯扫面视极化率分布  
Fig.3 Distribution of apparent polarizability in induced polarization intermediate gradient of study area



率极大值为 10.01,区内异常分布连续,异常区东部未闭合,同时该异常表现为中、高阻特征(图 4),结合区域地质资料可知该异常区为断裂交汇处,同时也是安山岩和灰岩的接触带,因此,初步推断该区异常可能与深部多金属矿化有关。此外,由异常区内激电测深点的反演结果(图 5d)结合区域地质资料,可将 M2 异常区域内地层分为 3 层:第 1 层(0~2 m)表现为低阻、高极化特征,这种现象可能主要与浅部土壤第四系中含有的铁锰矿及银锰矿化有关;第 2 层(2~300 m)表现为高阻、低极化特征,与区域广泛分布的灰岩地层电性参数特征(表 2)相一致,推测为表层灰岩地层;第 3 层(300 m 以下)表现为明显的低阻、高极化特征,推测为中、深部凝灰岩地层,可能含有铅锌矿化,为重点成矿有利区,建议在该异常区布置深度大于 300 m 的钻孔进行验证。

### 3.2 典型剖面异常特征及综合解释

由云南澜沧老厂矿区剖面下方的 AMT 二维反演结果(图 6a)结合区域地质资料,绘制了辖区下方的综合地球物理解释(图 6b)。从图 6a 中可以发现,研究区整体电性结构表现为高低相间垂向分带的特征。

研究区剖面在横向上可分为 3 段,分别为老厂矿区范围段(水平 0~1 400 m),矿权范围段(水平

1 400~3 900 m)及矿权范围东段(水平 3 900~4 700 m)。老厂矿区范围段西侧(水平 0~300 m)上部主要表现为高阻特征,与该区域出露的下二叠统白云质灰岩覆盖范围基本一致。该段西部(水平 0~800 m)中、深部出现大面积的中、高阻异常(R1),电阻率值普遍大于  $6\,000\ \Omega \cdot \text{m}$ ,推断为中上石炭统( $C_{2+3}$ )的灰岩及白云岩地层,在深部向 SW 方向倾伏。该段东部(水平 300~1 400 m)中、深部存在 1 个高阻异常 R2,阻值普遍大于  $6\,000\ \Omega \cdot \text{m}$ ,推断是隐伏花岗斑岩的电性反映,在深部向 NE 方向倾伏。R2 被中、低阻带环绕,中、低阻带推断为下石炭统依柳组( $C_{1y}$ )地层,局部形成阻值普遍小于  $300\ \Omega \cdot \text{m}$  的低阻异常(C1 与 C2),低阻异常 C2 附近可能为多金属矿化区。矿权范围段表层表现为低阻特征,随着深度的增大,阻值逐渐升高,达到一定深度后,阻值又逐渐降低。表层低阻带与区域出露的浮土、松散堆积体和浅部第四系地层对应良好。中上部中、高阻带推断为中上石炭统( $C_{2+3}$ )的灰岩及白云岩地层,局部形成高阻异常 R4,阻值普遍大于  $3\,000\ \Omega \cdot \text{m}$ 。中下部中、低阻带推断其为下石炭统依柳组( $C_{1y}$ )火山岩地层。深部存在高阻异常 R3,电阻率值普遍大于  $6\,000\ \Omega \cdot \text{m}$ ,推断为深部隐伏花岗斑岩。另外水平 2 800~3 200 m 中部存在一

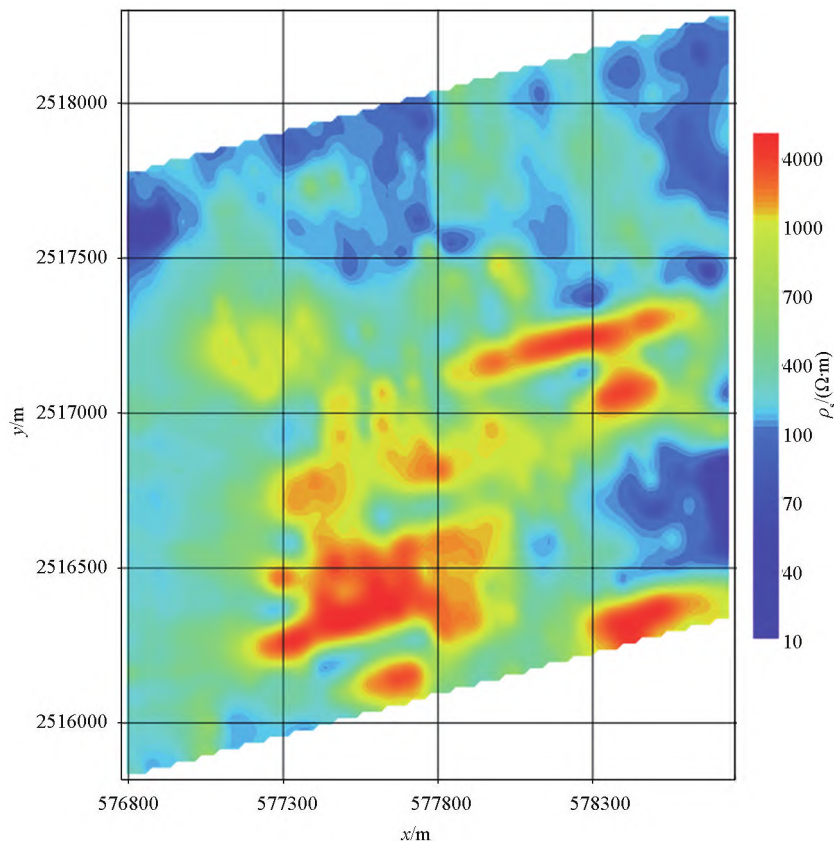
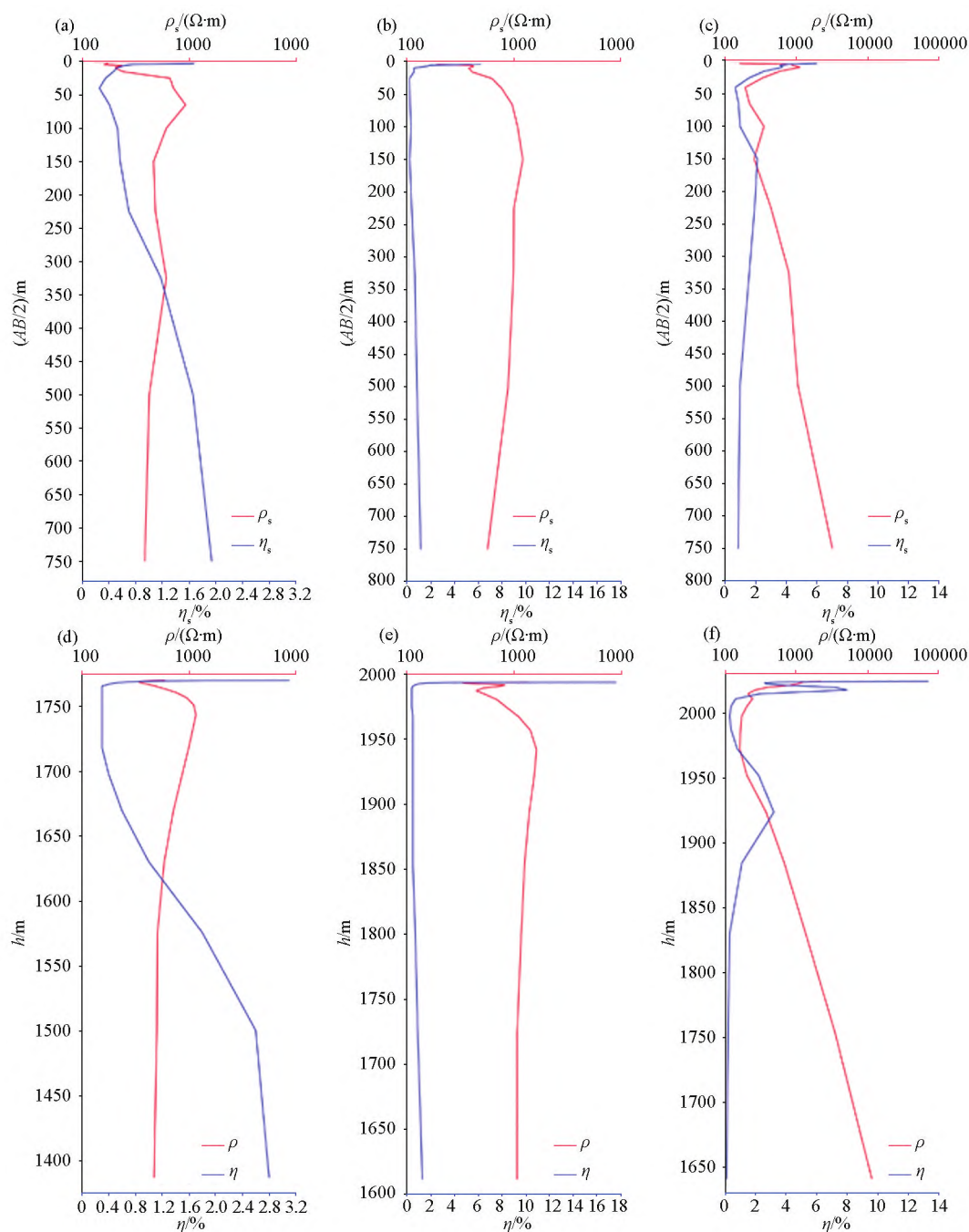


图 4 研究区激电中梯扫面视电阻率分布

Fig.4 Distribution of apparent resistivity in induced polarization intermediate gradient of study area



a—CS1 实测数据;b—CS2 实测数据;c—CS3 实测数据;d—CS1 反演结果;e—CS2 反演结果;f—CS3 反演结果

a—measured data of CS1;b—measured data of CS2;c—measured data of CS3;d—inversion result of CS1;e—inversion result of CS2;f—inversion result of CS3

图 5 研究区激电测深实测数据反演结果

Fig.5 Inversion results of measured induced polarization sounding data in the study area

低阻异常 C3,阻值普遍小于  $300 \Omega \cdot \text{m}$ ,可能为深部构造破碎带或者多金属矿化区。矿权范围东段整体表现为中、低阻特征且阻值变化较小,推断为下石炭统依柳组( $C_{1y}$ )火山岩地层。

根据电阻率剖面电性横向梯度带和低阻分布特征,在解释模型(图 6b)中推断出 9 条断裂。其中位于 400 m(022 号点附近)附近为已知断裂  $F_3$ ,800 m

(040 号点附近)附近为已知断裂  $F_1$ ,860 m(043 号点东侧)附近为已知断裂  $F_6$ ,950 m(048 号点)附近为已知断裂  $F_4$ ,1 300 m(064 号点)附近为已知断裂  $F_8$ ,1 800 m(088 号点)附近为推断断裂  $F_{43}$ ,2200 m(112 号点)附近为已知断裂  $F_{41}$ ,3 250 m(164 号点)附近为已知断裂  $F_{42}$ ,3 850 m(194 号点)附近为已知断裂  $F_{27}$ 。剖面辖区下方推断的断裂均向 NE 方向

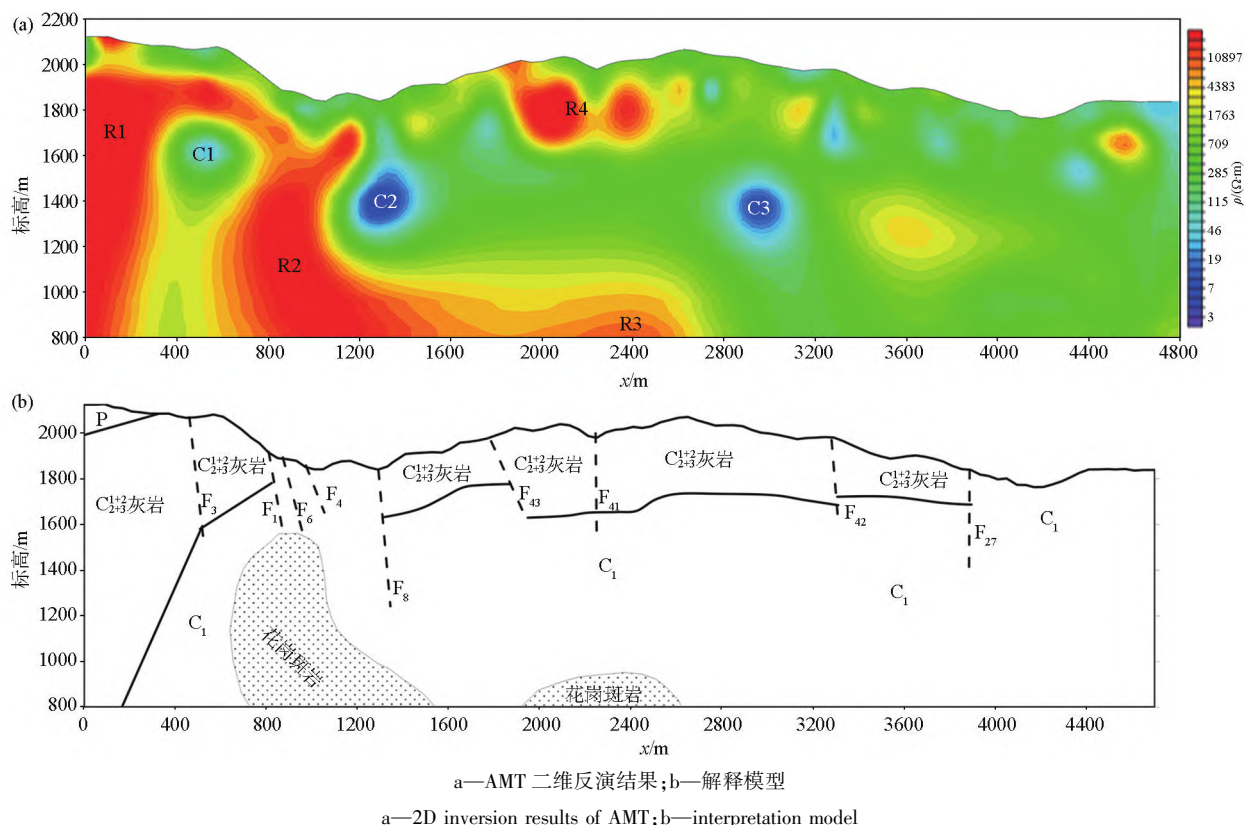


图6 综合地球物理解释

Fig.6 Comprehensive geophysical interpretation

陡倾。

研究区激电中梯扫面结果(图3、图4)显示,M1异常区整体表现为中、低阻高极化率特征,视极化率普遍大于2.5%,视电阻率主要位于40~1 000  $\Omega \cdot m$  范围内。同时异常区内激电测深点的反演结果(图5e)显示,M1异常区在地下300 m附近视极化率具有上升趋势,这种现象可能与区域深部存在的多金属矿化有关。结合AMT二维反演结果(图6a)与区域地质资料,水平2 300~2 800 m内地层可以分为3层:第1层(0~2 m)激电测深表现为低阻、高极化特征,同时AMT反演结果表层表现为低阻特征,与浅部出露的银锰矿化土壤第四系对应良好;第2层(2~450 m)激电测深曲线末支表现为高阻、低极化特征,同时AMT反演结果表现为高阻区,深部在450 m以内,与异常区域内的灰岩电性参数(表2)及厚度特征吻合良好,因此推测该层为表层灰岩地层;第3层(450 m以下)AMT反演结果中表现为中、低阻特征,由于区域内该深度主要为下石炭统依柳组( $C_{1y}$ )地层,结合区域岩(矿)石电性参数统计(表2),推测该区域可能为中、深部凝灰岩地层,且深部1 000 m以下的高阻异常R3很可能为隐伏花岗斑岩体。此外,区域综合地球物理解释(图6)显示,该隐伏花岗斑岩在深部向NE方向倾伏,其东侧的深

断裂 $F_8$ 切穿灰岩地层且具有向隐伏岩体R2连通的趋势,据此推断二者的耦合部位为深部多金属矿化有利区,建议在测点122附近布置深度1 200 m左右的钻孔进行验证。

#### 4 结论

通过在云南澜沧老厂多金属矿区开展综合物探研究,得到以下主要结论:

1)基于大功率激电数据圈出2处激电异常区。其中,位于测区西北部的M1异常区表现为低阻、高极化异常特征,可能是地表铁锰矿、银锰矿和深部多金属矿化的共同反映;位于测区中东部的M2异常区表现为高阻、高极化异常特征,可能与深部多金属矿化有关。

2)基于AMT数据二维反演获得的电性结构和已有地质资料,查明了控矿地层、断裂的空间展布,具体表现为:中上石炭统( $C_{2+3}$ )的灰岩及白云岩地层在花岗斑岩体西侧厚度较大,并向SW方向倾伏,在岩体东侧覆盖较薄,下伏地层为下石炭统依柳组( $C_{1y}$ );隐伏花岗斑岩在深部向NE方向倾伏,其东侧的深断裂 $F_8$ 切穿灰岩地层且具有向隐伏岩体连通的趋势,推断二者的耦合部位为深部多金属矿化



有利区。

3) 将大功率激电法和 AMT 相结合, 有助于圈定深部隐伏岩体的分布范围, 提升研究区多金属矿探测的可靠性, 为后续钻孔布设提供指导。

## 参考文献 (References):

- [1] 王安建, 曹殿华, 管焯, 等. 西南三江成矿带中南段金属矿床成矿规律与若干问题探讨[J]. 地质学报, 2009, 83(10): 1365-1375.  
Wang A J, Cao D H, Guan Y, et al. Metallogenic belts of south Three Rivers region, southwest China: Distribution, characteristics, and discussion[J]. Acta Geologica Sinica, 2009, 83(10): 1365-1375.
- [2] 高兰, 肖克炎, 丛源, 等. 西南三江铅锌银铜锡金成矿带成矿特征及资源潜力[J]. 地质学报, 2016, 90(7): 1650-1667.  
Gao L, Xiao K Y, Cong Y, et al. Metallogenic characteristics and mineral resource potential of the southwestern Shanjia Zn-Pb-Cu-Ag-Sb-Au metallogenic belt[J]. Acta Geologica Sinica, 2016, 90(7): 1650-1667.
- [3] 李峰, 鲁文举, 杨映忠, 等. 危机矿山成矿规律与找矿研究: 以云南澜沧老厂矿床为例[M]. 昆明: 云南科技出版社, 2010.  
Li F, Lu W J, Yang Y Z, et al. Metallogenic regularities and exploration on crisis mine: As exemplified by the Laochang polymetallic deposit, Yunnan [M]. Kunming: Yunnan Science and Technology Press, 2010.
- [4] 叶霖, 高伟, 杨玉龙, 等. 云南澜沧老厂铅锌多金属矿床闪锌矿微量元素组成[J]. 岩石学报, 2012, 28(5): 1362-1372.  
Ye L, Gao W, Yang Y L, et al. Trace elements in sphalerite in Laochang Pb-Zn polymetallic deposit, Lancang, Yunnan Province [J]. Acta Petrologica Sinica, 2012, 28(5): 1362-1372.
- [5] 杨帆. 澜沧老厂多金属矿床叠加成矿系统特征及成矿模式[D]. 昆明: 昆明理工大学, 2014.  
Yang F. Characteristics of superimposed metallogenic system and metallogenic model of Laochang polymetallic deposit in Lancang [D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology, 2014.
- [6] 张云付. 云南澜沧老厂铅锌矿区物化探异常特征及找矿预测[J]. 矿产与地质, 2020, 34(3): 510-516.  
Zhang Y F. Geophysical and geochemical anomaly characteristics and prospecting prediction in Laochang lead and zinc mining area in Lancang County of Yunnan [J]. Mineral Resources and Geology, 2020, 34(3): 510-516.
- [7] 李小明, 王党靠, 李得元, 等. 云南澜沧老厂银铅锌铜多金属矿床流体化学特征及找矿方向预测[J]. 云南冶金, 2022, 51(3): 12-16, 24.  
Li X M, Wang D K, Li D Y, et al. Chemical characteristics and prospecting direction prediction of Silver-lead-zinc copper polymetallic deposits' fluid in Laocang of Lancang, Yunnan [J]. Yunnan Metallurgy, 2022, 51(3): 12-16, 24.
- [8] 袁桂琴, 熊盛青, 孟庆敏, 等. 地球物理勘查技术与应用研究[J]. 地质学报, 2011, 85(11): 1744-1805.  
Yuan G Q, Xiong S Q, Meng Q M, et al. Geophysical exploration technology and application research [J]. Acta Geologica Sinica, 2011, 85(11): 1744-1805.
- [9] 张光之, 周立国, 王延浩. 综合电法在内蒙古查敖包银铅锌矿区的应用[J]. 地球物理学进展, 2015, 30(2): 867-871.  
Zhang G Z, Zhou L G, Wang Y H. Application of integrated electrical methods to silver lead-zinc mine zone of Chaobao in Inner Mongolia [J]. Progress in Geophysics, 2015, 30(2): 867-871.
- [10] 毕炳坤, 常云真, 施强, 等. 综合物探在崞山东部浅覆盖区勘查银多金属矿床中的应用[J]. 物探与化探, 2019, 43(5): 976-985.  
Bi B K, Chang Y Z, Shi Q, et al. The application of geophysical exploration to prospecting for silver-lead-zinc deposits in shallow cover areas of eastern Xiaoshan [J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2019, 43(5): 976-985.
- [11] 张前进, 杨进. 综合电法在深部隐伏矿体勘查中的应用实例[J]. 物探与化探, 2010, 34(1): 40-43.  
Zhang Q J, Yang J. The application of integrated electric methods to the exploration of deep concealed ore bodies [J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2010, 34(1): 40-43.
- [12] 杨宗耀, 唐菊兴, 任东兴, 等. 西藏斯弄多银多金属矿床地球物理和地球化学勘查进展[J/OL]. 地球科学: 1-30 [2023-04-06]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/42.1874.P.20220607.0926.006.html>.  
Yang Z Y, Tang J X, Ren D X, et al. Geochemical and geophysical exploration in Sinongduo Ag polymetallic deposit, Tibet [J/OL]. Earth Science: 1-30 [2023-04-06]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/42.1874.P.20220607.0926.006.html>.
- [13] Farquharson C G, Craven J A. Three-dimensional inversion of magnetotelluric data for mineral exploration: An example from the McArthur River uranium deposit, Saskatchewan, Canada [J]. Journal of Applied Geophysics, 2009, 68(4): 450-458.
- [14] Garcia X, Jones A G. Atmospheric sources for audio-magnetotelluric (AMT) sounding [J]. Geophysics, 2002, 67(2): 448-458.
- [15] 汤井田, 任政勇, 周聪, 等. 浅部频率域电磁勘探方法综述[J]. 地球物理学报, 2015, 58(8): 2681-2705.  
Tang J T, Ren Z Y, Zhou C, et al. Frequency-domain electromagnetic methods for exploration of the shallow subsurface: A review [J]. Chinese Journal of Geophysics, 2015, 58(8): 2681-2705.
- [16] 何帅, 杨炳南, 阮帅, 等. 三维 AMT 正反演技术对贵州马坪含金刚石岩体探测的精细解释[J]. 物探与化探, 2022, 46(3): 618-627.  
He S, Yang B N, Ruan S, et al. Fine interpretation of the exploration results of diamond-bearing rock masses in maping area, Guizhou using the 3D AMT forward modeling and inversion technologies [J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2022, 46(3): 618-627.
- [17] 高科宁, 邓居智, 刘文玉, 等. 黑龙江省三合屯金矿床深部电性结构与成矿模式[J]. 吉林大学学报: 地球科学版, 2022, 52(3): 684-700.  
Gao K N, Deng J Z, Liu W Y, et al. Deep electrical structure and metallogenic model in Sanhetun mining area, Heilongjiang Province [J]. Journal of Jilin University: Earth Science Edition, 2022, 52(3): 684-700.
- [18] 陈仕炎. 澜沧铅矿老厂矿区综合信息成矿预测[D]. 昆明: 昆明

理工大学,2006.

Chen S Y. Comprehensive information metallogenic prediction in Laochang mining area of Lancang lead mine [D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology, 2006.

[19] 高建国. 澜沧老厂铅锌多金属矿床综合成矿信息与定位定量预测 [D]. 昆明: 昆明理工大学, 2007.

Gao J G. Research on the synthetic metallogenic information and the positioning location and quantitative prediction of resource orientation for Lancang-Laochang lead zinc-polymetallic deposit [D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology, 2007.

[20] Egbert G D. Robust multiple-station magnetotelluric data processing [J]. Geophysical Journal International, 1997, 130(2): 475-496.

## Application of integrated geophysical methods in deep ore prospecting of Laochang polymetallic mining area in Lancang, Yunnan

YOU Yue-Xin<sup>1,2</sup>, DENG Ju-Zhi<sup>1,2</sup>, CHEN Hui<sup>1,2</sup>, YU Hui<sup>1,2</sup>, GAO Ke-Ning<sup>1,2</sup>

(1. State Key Laboratory of Nuclear Resources and Environment, East China University of Technology, Nanchang 330013, China; 2. School of Geophysics and Measurement-control Technology, East China University of Technology, Nanchang 330013, China)

**Abstract:** Laochang, Lancang, Yunnan is one of the most important polymetallic mining areas in the southern part of Sanjiang Tethys metallogenic belt. After years of mining, the shallow resources are nearly exhausted. In recent years, granite porphyry and porphyry polymetallic mineralization have been newly discovered in the deep part of the mining area, highlighting the prospecting potential of deep polymetallic deposits. In order to trace the occurrence of deep ore-controlling strata and structures in the study area and help to make a breakthrough in deep ore prospecting, high-power induced polarization method and audio magnetotelluric method were implemented to image the deep structure situated. Results obtained from the inversion of the measured induced polarization and electromagnetic data recuperated the distribution of induced polarization anomalies and the characteristics of deep electrical structure within the study area. Combined with the available regional geological settings, the main conclusions are as follows: The low resistance and high polarization anomalies in the northwest of the survey area are deeply related to the surface ferromanganese, silver manganese, and deep polymetallic mineralization, and the high resistance and high polarization anomalies in the middle and east of the survey area are in good agreement with the deep polymetallic mineralization. The upper Carboniferous limestone and dolomite strata are thick in the west and thin in the east, with the west strata dipping to SW and the east strata overlying the Yiliu Formation of the lower Carboniferous. The concealed granite porphyry dips in NE direction, and the coupling part between its deep 2 300~2 800 m horizontal section and deep fault is a favorable area for deep polymetallic mineralization. Notably, joint interpretation yielded from the high-power induced polarization method and the audio magnetotelluric method applied improved the reliability of deep polymetallic ore detection and provided more information of positioning the subsequent drilling layout.

**Key words:** Laochang polymetallic mining area; high-power induced polarization; audio frequency magnetotelluric; comprehensive geophysical prospecting; deep ore prospecting

(本文编辑:王萌)